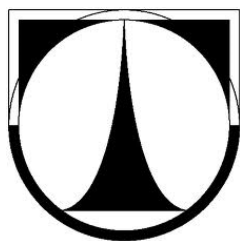


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy



Měření ferorezonance v třífázovém obvodu

**Ferroresonance measurement in three phase
circuit**

Bakalářská práce

Autor práce:

Aleš Krček

Vedoucí práce:

Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Konzultant práce:

Ing. Jiří Kubín, Ph.D.

V Liberci 17. 5. 2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Aleš Krček
Osobní číslo: M09000326
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy
Název tématu: Měření ferorezonance v třífázovém obvodu
Zadávající katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s pojmem ferorezonance. Zaměřte se na obvody s přístrojovými transformátory napětí.
2. Navrhněte a sestrojte vhodnou topologii obvodu pro měření ferorezonance v třífázovém obvodu. Cílem měření bude určit při jakých konfiguracích a parazitních kapacitách obvodu dochází k ferorezonanci.
3. Vytvořte program pro automatizované měření oblastí ferorezonance.
4. Změřené výsledky zpracujte do grafů.


Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: cca 30–40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] KOČIŠ, Lubomír. Ferorezonance v sítích vn a vvn – principy a opatření. Elektrotechnický magazín ETM 8/2007
- [2] FERRACCI, Philippe. Cahier technique no 190 – Ferroresonance. [online]. [cit. 2. 10. 2007] Groupe Schneider. 1998. Dostupné na [www: http://www.technical-publications.schneider-electric.com/documents/technical-publications/en/shared/electrical-engineering/electrical-environmental-constraints/general-knowledge/ect190.pdf](http://www.technical-publications.schneider-electric.com/documents/technical-publications/en/shared/electrical-engineering/electrical-environmental-constraints/general-knowledge/ect190.pdf)
- [3] TOMAN, Petr. Přístrojové transformátory napětí. Str. 133-198. Kapitola v: CHMELÍK, Karel, kol. Chránění III – elektrická zařízení vysokého napětí. Irena Satinská – IRIS. 2005. ISBN 80-903540-5-X

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2012
Termín odevzdání bakalářské práce: 17. května 2013


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2012

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum.....

Podpis.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D. za odborné vedení práce, poskytování cenných rad, informačních podkladů a za jeho ochotu a čas, který mi věnoval. Nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině za trpělivost a podporu po celou dobu studia.

Abstrakt

Tato práce obsahuje měření vzniku a parametrů ferorezonance v třífázovém obvodu. Na začátku popisuji vlastnosti ferorezonančního jevu a zaměřuji se na síť vysokého napětí s přístrojovými transformátory napětí. V další části navrhuji vhodnou topologii obvodu pro měření ferorezonance v třífázovém obvodu. Následně provedu její realizaci a měřením pomocí měřicího skriptu určuji při jakých konfiguracích a parazitních kapacitách obvodu dochází k ferorezonanci.

Klíčová slova:

Ferorezonance, přechodové jevy, přístrojový transformátor napětí

Abstract

This work contains measuring of origin and parameters of ferroresonance in a three-phase circuit. At the beginning I describe characteristics of ferroresonance phenomenon and I focus on high-voltage networks with instrumental voltage transformer. In the next part I suggest appropriate topology of circuit for measuring of ferroresonance in the three-phase circuit. Afterwards I will carry out its realization and by using of measuring script I will determine during which configurations and parasite capacities of circuit the ferroresonance occurs.

Key words:

Ferroresonance, transient phenomena, instrument voltage transformer

Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Abstrakt.....	5
Abstract.....	6
Seznam Obrázků	8
Seznam Symbolů	9
Úvod.....	10
1 Rezonance.....	11
1.1 Činitel jakosti	12
2 Ferorezonance.....	13
3 Fyzikální přístup	16
4 Hlavní charakteristiky.....	19
5 Příklady elektrických systémů kde se vyskytuje ferorezonance.....	22
5.1 Napět'ový transformátor napájený přes kapacitu jednoho (nebo více) otevřených jističů.....	22
5.2 Napět'ový transformátor zapojený v izolované síti.....	23
5.3 Transformátor napájený pouze jednou nebo dvěma fázemi	24
5.4 Napět'ové transformátory a transformátory vvn/vn s izolovanou nulou.....	25
5.5 Sítě vn uzemněné Petersenovou tlumivkou	26
5.6 Transformátor napájený vedením s vysokou kapacitou a nízkým zkratovým výkonem.....	27
5.7 Shrnutí	28
6 Měření.....	29
6.1 Schémata zapojení.....	31
6.2 Použité přístroje	32
6.3 Výsledky	33
7 Závěr.....	40

Seznam Obrázků

Obr. 1: Obvod sériové rezonance	11
Obr. 2: rozdíl mezi rezonancí a ferorezonancí.....	14
Obr. 3: Vznik ferorezonance.....	14
Obr. 4: Kmity ferorezonančního obvodu	17
Obr. 5: Ferorezonanční skok.....	20
Obr. 6: Citlivost počátečních stavů.....	21
Obr. 7: Transformátor napětí zapojen v sérii s otevřeným vypínačem.....	22
Obr. 8: Ferorezonance přístrojových transformátorů napětí v IT síti	23
Obr. 9: Příklady asymetricky napájených systémů s rizikem ferorezonance	24
Obr. 10: Ferorezonance přístrojových transformátorů přes kapacitu napájecího transformátoru.....	25
Obr. 11: Síť IT uzemněná přes reaktor	27
Obr. 12: Náhradní obvod nezatíženého výkonového transformátoru napájeného vedením s vysokou kapacitou.....	27
Obr. 13: Třífázová soustava se sekundárním vinutím transformátoru.....	31
Obr. 14: Aronovo zapojení – chybí zapojení země na zdroji!!!	31
Obr. 15: Normální průběh obvodových veličit při sepnutých dvou fázích (L2, L3) v zapojení podle obr. 13.....	33
Obr. 16: Rezonující průběh při sepnutých dvou fázích (L2, L3) v zapojení obr. 13.....	34
Obr. 17: Graf upadnutí do ferorezonance	34
Obr. 18: Průběh proudu na sekundárním vinutí.....	35
Obr. 19: Průběh napětí na zdroji a sekundárním vinutí	35
Obr. 20: Graf upadnutí do ferorezonance pro všechny fáze	36
Obr. 21: Graf upadnutí do ferorezonance fáze L2	36
Obr. 22: Graf upadnutí do ferorezonance fáze L3	37
Obr. 23: Graf upadnutí do ferorezonance fáze L1	38
Obr. 24: Průběh napětí U_{sec} , U_{zdr} , I_{sec}	38
Obr. 25: Graf upadnutí do ferorezonance, fáze L3	39
Obr. 26: Fotografie měřicího pracoviště.....	42

Seznam Symbolů

Značka	Veličina	Jednotka
C	kapacita	F
C_g	prahová kapacita	F
E	maximální hodnota amplitudy napětí	V
E_m	maximální energie	J
I	proud obvodu	A
I_{mag}	magnetizační proud	A
I_{sec}	proud sekundárního vinutí	A
L	impedance	H
M	stav systému	-
Q	činitel jakosti	Ω
R_s	ztrátový odpor	Ω
U	napětí soustavy	V
U_c	napětí na kapacitě	V
U_R	napětí na odporech	V
U_L	napětí na indukčnosti	V
U_{zdr}	napětí zdroje	V
U_{sec}	napětí sekundárního vinutí	V
Z	impedance	Ω
ω	úhlová frekvence	rad.s ⁻¹
ϕ	magnetický tok	Wb
ϕ_{sat}	saturační magnetický tok	Wb

Úvod

Snaha o snižování ztrát v energetickém systému plynoucí z ekologických a ekonomických požadavků je důvodem stále častějšího výskytu různých náhodných dějů. Důležité je brát celý systém jako celek, takže je nutné počítat s faktem, že při snížení ztrát dojde k snížení zatlumení systému na jakoukoliv změnu a tedy i na charakter přechodných dějů. V elektrické soustavě se většinou jedná o krátkodobé zvýšení či snížení napětí. Může nastat případ, že v důsledku změny v systému se trvale zvýší napětí, což může mít destruktivní účinky na většinu spotřebičů.

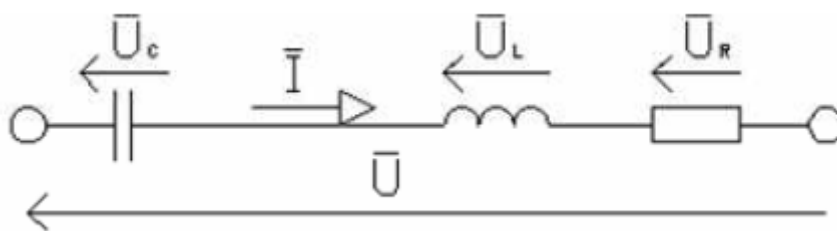
Cílem této bakalářské práce je seznámení se s jedním z těchto destruktivních jevů, kterým je ferorezonanční jev, jenž vlivem LC oscilace poškozuje napěťové transformátory v elektrických rozvodnách. Pro snížení rizika vzniku tohoto jevu se zabývám určením rozsahu parazitních kapacit, ve kterém k ferorezonanci v třífázovém obvodu může dojít.

Rozsah kapacit, ve kterém je riziko ferorezonance, budu zjišťovat experimentem na modelu měřicího uzlu vysokého napětí. Z bezpečnostních důvodů bude experiment proveden na nízkém napětí. V obvodu budou použity spínací relé na místo vn vypínačů, parazitní kapacity budou nahrazeny kondenzátory a místo napěťového transformátoru bude použita jen jeho vnitřní část se sekundárním vinutím. Celý tento obvod bude napájen programovatelným zdrojem.

Práce je rozdělena na teoretickou část popisující jev ferorezonance a konfigurace trojfázové sítě vn, ve kterých k němu může dojít. Praktická část popisuje experimentální určení rizikového rozsahu parazitních kapacit sítě.

1 Rezonance

Rezonance je snaha systému kmitat na větší amplitudě více při určitých frekvencích než u ostatních. Tyto frekvence jsou známy jako rezonanční. V řadě případů rezonance využíváme např. kmitočtové normály, filtry atp. V jiných případech jde o jev škodlivý, kde vysoké hodnoty proudů nebo napětí mohou dosáhnout vysokých amplitud, pro přístroje nepřijatelných a mohou je poškodit, ne-li přímo zničit.



Obr. 1: Obvod sériové rezonance

Nejjednodušším rezonančním obvodem je paralelní či sériový, viz obr. 1. Vlastní kmitočet takového obvodu je kmitočet, při kterém se reaktance akumulacních prvků vzájemně vyruší, tedy při podmínce

$X_L = X_C$ respektive $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ kde L , C , X , ω_0 značí indukčnost, kapacitu, reaktanci a úhlový kmitočet vlastních kmitů.

Pokud jde o sériovou rezonanci s harmonickým buzením ($U = E \cos \omega t$), je vztah pro napětí

$$U = U_R + U_L + U_C \quad (1.1)$$

Celková impedance sériového rezonančního obvodu se rovná

$$Z = R_s + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R_s + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (1.2)$$

Z definice rezonance plyne, že při rezonanční frekvenci je celková impedance obvodu pouze reálná. Označuje se Z_0 a nazývá se rezonanční impedance. Zřejmě platí $Z_0 = R_s$.

Napájíme-li rezonanční obvod zdrojem napětí o ferorezonanční frekvenci, tak je proud procházející do obvodu

$$I = \frac{U}{Z_0} = \frac{U}{R_s}. \quad (1.3)$$

V obvodu RLC se při určitém kmitočtu podstatně zvětší proud u sériového obvodu nebo se podstatně zvětší napětí u obvodu paralelního. Sériový rezonanční obvod má při rezonančním kmitočtu nejmenší možnou impedanci. Paralelní rezonanční obvod má při rezonančním kmitočtu největší impedanci. Obvod má při této frekvenci pouze činný odpor.

1.1 Činitel jakosti

V součástkách skutečného rezonančního obvodu vznikají při průchodu proudem ztráty.

Činitel jakosti cívky, kondenzátoru a obvodu se definuje vztahem

$$Q = 2\pi \frac{E_m}{E_T} \quad (1.4.)$$

Kde E_m je maximální energie akumulovaná na daném prvku, jehož činitel jakosti je třeba určit, a E_T je energie, která se na daném prvku přemění na jiné formy energie (teplo, světlo, atp.) [7].

2 Ferorezonance

Ferorezonance je oscilace LC obvodu, při níž dochází k přesycování jádra magnetického obvodu indukčnosti L .

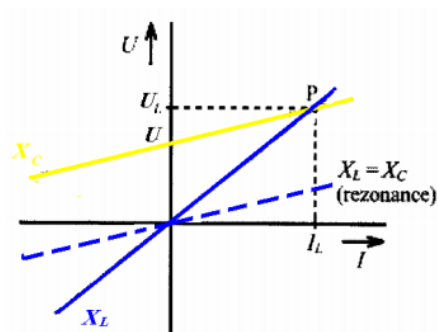
Hlavní rozdíly mezi ferorezonančním obvodem a lineárním rezonančním obvodem jsou:

- Pro daný typ přesytitelné induktance rezonuje ferorezonanční obvod v širším rozsahu kapacity.
- Průběhy střídavého napětí a proudu v obvodu při ferorezonanci mohou být nesinusové, přestože je obvod napájen sinusovým průběhem.
- Existence více stabilních stavů odezvy obvodu pro dané parametry prvků obvodu. Jeden ze stavů je označován jako „normální“ s lineárními závislostmi obvodových veličin, zatímco ostatní „abnormální“ stavy jsou potenciálně nebezpečné pro prvky obvodu. Rozhodující úlohu na stav obvodu přitom mají počáteční podmínky (počáteční náboj na kapacitoru a remanentní tok v jádře transformátoru) v okamžiku připojení napájecího zdroje.
- Ferorezonance může být jednofázová nebo třífázová, je-li mezi fázemi nelineární magnetické spojení (např. trojfázový transformátor).

Rezonanční obvod

$$Z(\omega) = j\omega L - j \frac{1}{\omega C} + R_s$$

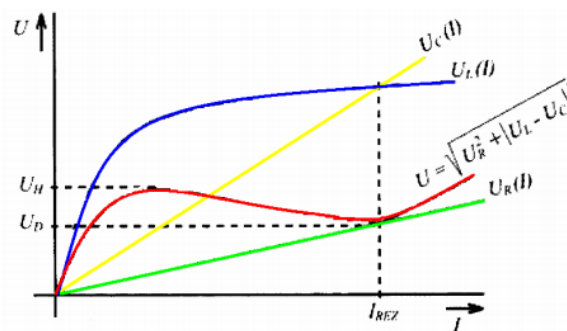
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



Ferorezonanční obvod

$$Z(\omega) = j\omega [f(i)] - j \frac{1}{\omega C} + R_s$$

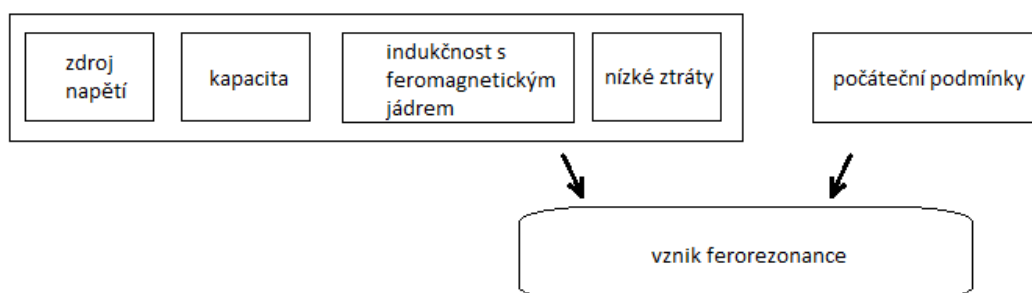
$$\omega_{rf} = \frac{1}{\sqrt{[f(i)]C}}$$



Obr. 2: rozdíl mezi rezonancí a ferorezonancí [9]

Podmínky nutné pro vznik ferorezonance:

- cívka s možností přesycení jádra – nejčastěji je jádro železné,
- kondenzátor, který s indukčností tvoří rezonanční obvod,
- střídavý zdroj schopný do rezonančního obvodu dodávat energii.



Obr. 3: Vznik ferorezonance

Ferorezonance je často doprovázena těmito příznaky:

- vysoké trvalé přepětí,
- vysoké trvalé nadproudy,
- vysoké trvalé deformace napět'ových a proudových vln,
- zahřívání transformátoru (v chodu naprázdno),
- kontinuální hlasitý hluk transformátoru,
- předčasné vypnutí ochrany zařízení,
- poškození elektrických zařízení nebo izolace kvůli tepelným účinkům.

Charakteristickým příznakem poškození transformátoru napětí u ferorezonance je zničené primární vinutí a neporušené sekundární vinutí.

V distribučních sítích s neúčinně uzemněným středem se za určitých podmínek vyskytují například ferorezonance přístrojových transformátorů napětí s kapacitou fázových vodičů proti zemi.

Abnormální míra harmonických a dočasné nebo dlouhodobé přepětí a nadproudy, které to způsobuje, jsou často nebezpečné pro elektrická zařízení. Při ferorezonanci vzniká tzv. ferorezonanční přepětí, které může dosahovat hodnot výrazně převyšujících jmenovité napětí U_m . Podmínkou vzniku a udržení ferorezonance jsou nízké ztráty rezonančního obvodu [2].

3 Fyzikální přístup

Víme, že lineární rezonanční obvod sestávající z indukčnosti L a kapacity C lze vybudit do rezonance o frekvenci $f = 1 / 2\pi \sqrt{LC}$. U obvodu s nelineární indukčností se ale při přesycení jádra cívky indukčnost cívky mění, jak vyplývá z obrázku 4, který znázorňuje závislost celkového magnetického toku cívky a tzv. diferenciální indukčnosti na proudu procházejícím cívkou.

Celkový tok $\Phi = N\phi$, kde N je počet závitů cívky a ϕ je magnetický tok jádra. Změny indukčností cívky mají za následek schopnost ferorezonančního obvodu kmitat na různých frekvencích, přesněji v určitém rozsahu frekvence. [6]

Odpovídající průběh vlnění je zobrazen na obrázku 4c a je typický pro periodickou ferorezonanci. Napětí na kapacitních svorkách se předpokládá U_0 .

V čase t_0 byl obvod sepnut a umožnil průchod proudu o oscilující frekvenci.

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Tok v jádře a napětí kondenzátoru se dá vyjádřit jako:

$$\phi = \left(\frac{U_0}{\omega_1} \sin \omega_1 t\right), \quad (3.2)$$

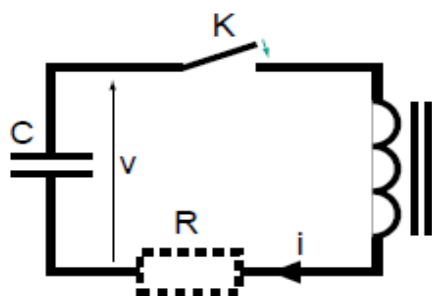
$$u = U_0 \cos \omega_1 t \quad (3.3)$$

Dosáhne-li magnetický tok v čase t_1 nasycení Φ_{sat} , napětí U začne přecházet do hodnoty U_2 . Induktance cívky nasyceného jádra dosáhne hodnoty L_s , formou oscilujícího impulsu

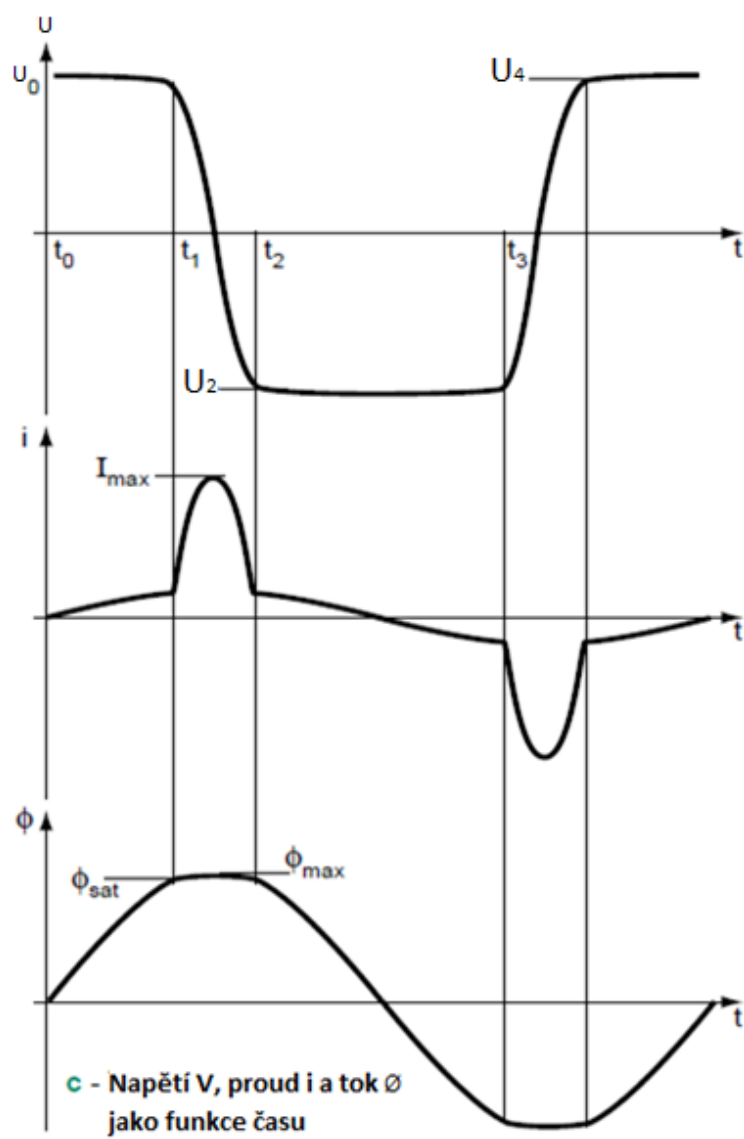
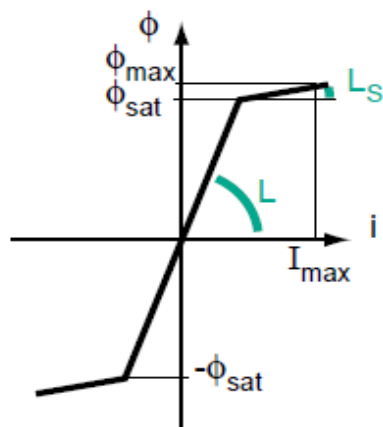
$$\omega_2 = 1/\sqrt{L_s C}, \quad (3.3)$$

kapacita obvodu se vybije přes tuto cívku do celého obvodu.

a - schéma zapojení



b - Zjednodušená charakteristika $f(i)$ Φ



c - Napětí V , proud i a tok Φ
jako funkce času

Obr. 4: Kmity ferorezonančního obvodu

Je-li elektromagnetická energie naindukována v cívce ekvivalentní k elektrostatické energii obnovené kapacitou $\frac{1}{2}CU_2^2$, proud a magnetický tok dosáhne vrcholu.

V čase t_2 se tok vrací do Φ_{sat} a indukčnost navazuje na hodnotu L , a jelikož ztráty jsou zanedbatelné, napětí U je ekvivalentní k převrácenému U_0 .

V čase t_3 se hodnota saturačního toku dostane do záporná na Φ_{sat} a napětí je rovno U_2 . ω_1 je v praxi velmi malé, můžeme považovat $U_2 \gg U_1 \gg U_0$. Následkem toho perioda T kmitá a je zahrnuta mezi $2\pi LC$ v nenasyceném stavu a $2\pi L_s C + 2(t_3 - t_2)$ v nasyceném stavu (kde $t_3 - t_2 \approx 2\phi / V_0$). Odpovídající frekvence $f = \frac{1}{T}$ je tedy taková:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (3.5)$$

Tato počáteční frekvence závisí na ϕ_{sat} v oblasti nelinearity a na počáteční podmínce U_0 .

V praxi, vzhledem ke ztrátám Ri^2 na rezistorech R (hlavně na každém obrácení napětí) se amplituda napětí U zmenšuje ($U_2 < U_1 < U_0$). Pokud je rozdíl toku $\Delta\phi$ během periody nasycení v čase $(t_3 - t_2)$ rovno $\Delta\phi$, snížení napětí má za následek snížení frekvence.

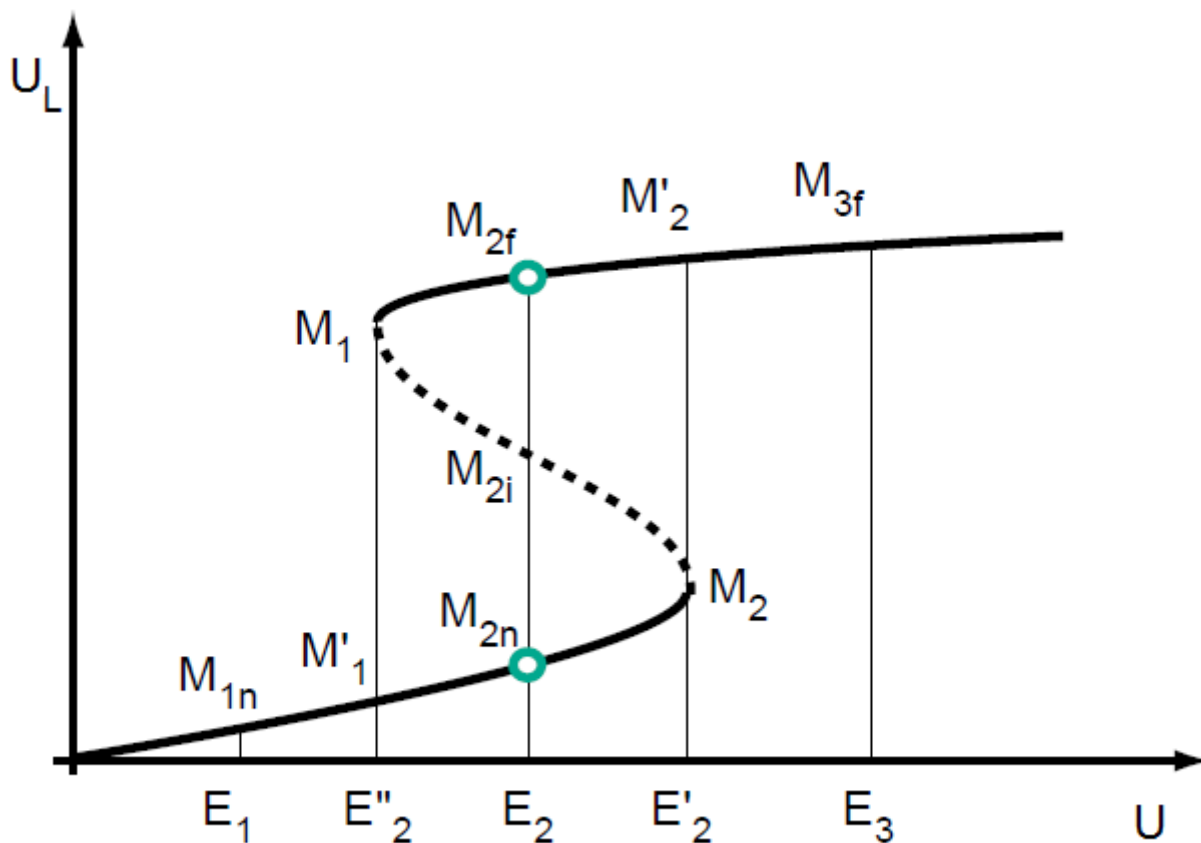
$$\Delta\phi = 2\phi_{sat} = \int_{t_2}^{t_3} u dt \quad (3.6)$$

4 Hlavní charakteristiky

Průběh úbytku napětí na nelineární indukčnosti U_L je vzhledem k hodnotě amplitudy sinusového napájecího zdroje zobrazen na obr. 5. Pokud zvyšujeme postupně napětí napájecího zdroje U od 0, tak jsou zde tři různé možnosti chování systému v závislosti na hodnotě napětí zdroje U .

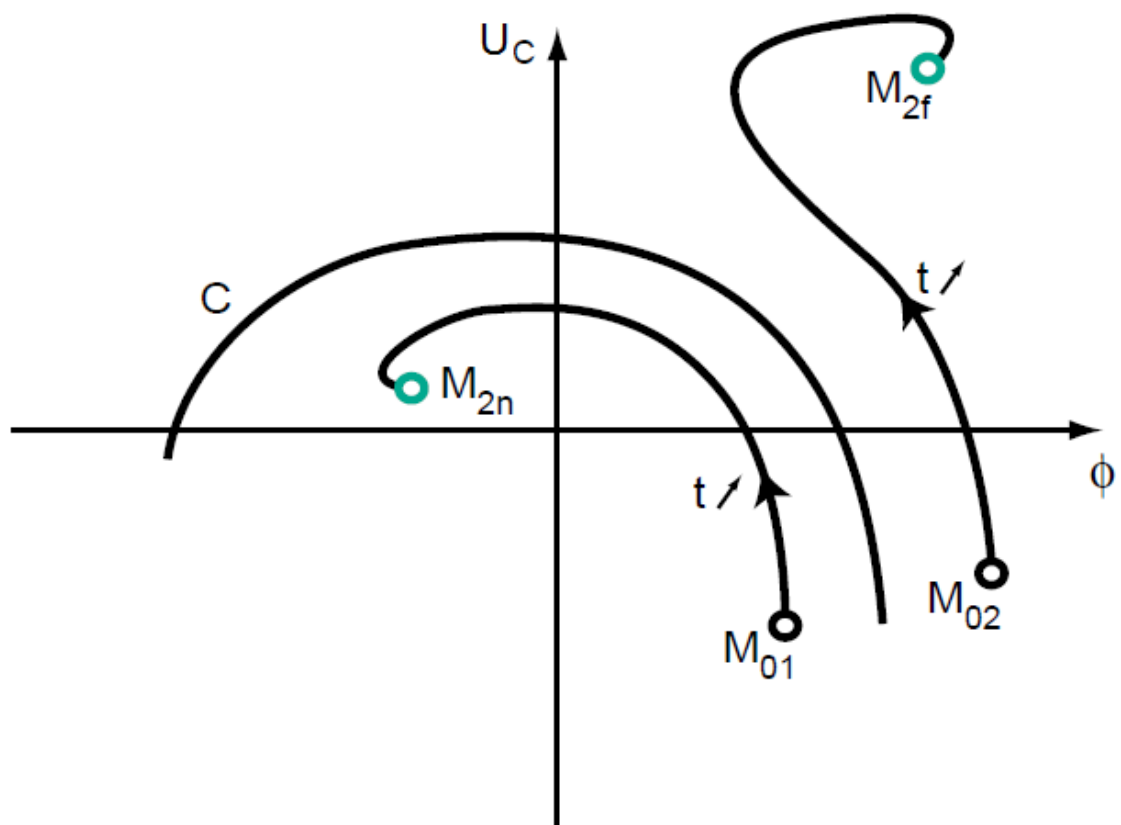
- Pro napětí v bodě E_1 je pouze jedno řešení v bodě M_{1n} odpovídající normálnímu stavu (lineární chování obvodu).
- Pro napětí zdroje v bodě E_2 existují tři řešení (M_{2n} , M_{2i} , M_{2f}). Dvě z nich jsou stabilní, přičemž M_{2n} souvisí se normálním stavem, kdežto M_{2f} se stavem ferorezonančním. Přerušovaná oblast je oblastí nestability (v praxi by se neměla vyskytovat).
- Pro napětí v bodě E'_2 se úbytek napětí U_L náhle zvýší z M_2 do M'_2 . Tomuto jevu říkáme fenomén skoku, kde M_2 označuje limitní bod.
- Pro napětí zdroje v bodě E_3 je zde možný pouze ferorezonanční stav M_{3f} .
- Pokud hodnota napětí zdroje E z výchozího stavu E_3 klesá, poklesne úbytek napětí U_L náhle z bodu M_1 do M'_1 , kde M_1 je druhým limitním bodem pro oblast skoku směrem dolů a zániku ferorezonance.

Fenomén skoku je charakteristický pro ferorezonanci, může být pozorován při dalších změnách systémových parametrů, jako např. odporu R či kapacity C , kde i malý rozdíl hodnot způsobí velký skok obvodových veličin mezi dvěma rozličnými stavy.



Obr. 5: Ferorezonanční skok

To, jestli se obvod nachází ve stavu M_{2n} nebo M_{2f} závisí na počátečním stavu obvodu. Obr. 6 znázorňuje trajektorii přechodového jevu párů veličin (FI , U_c) jako funkci času pro různé výchozí provozní podmínky (M_{01}, M_{02}). Křivka C je zde hraniční oblastí. Konečný stav (M_{2n} , M_{2f}) se projeví na té straně hranice C , ke které náleží daná vstupní podmínka určená zbytkovým magnetickým tokem, či napětím na kondenzátoru. Bod M_{2i} ležící na hraniční křivce je velmi citlivý na počáteční podmínky.



Obr. 6: Citlivost počátečních stavů

5 Příklady elektrických systémů kde se vyskytuje ferorezonance

Kvůli častému výskytu kapacit a nelineárních indukčností ve skutečné rozvodné síti a díky provozním podmínkám a konfiguracím je možnost výskytu ferorezonance značná.

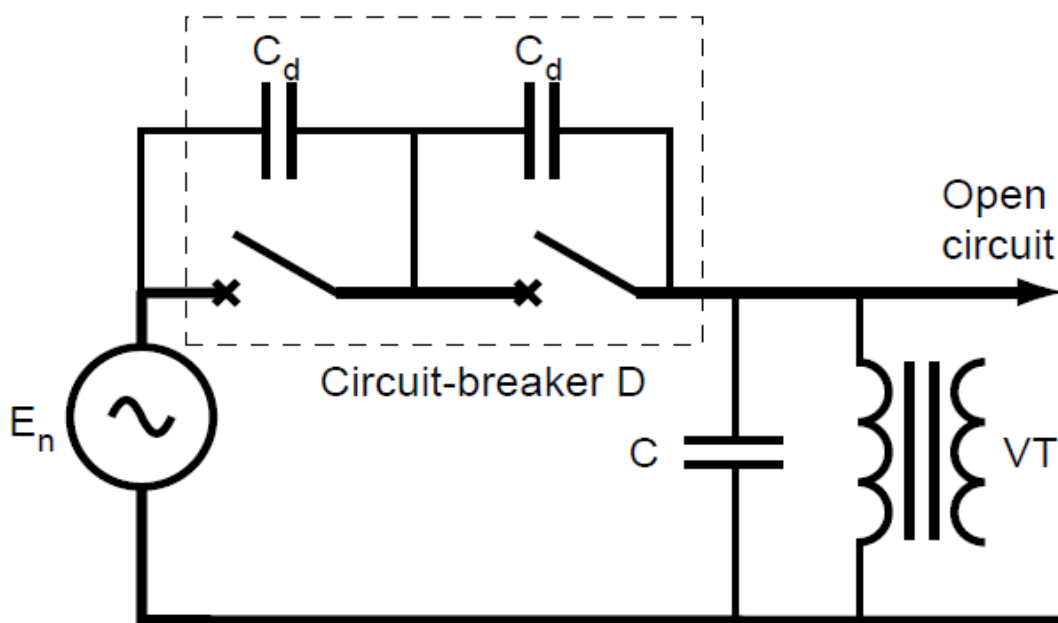
Zkušenost nicméně umožnila určit základní typické konfigurace, které mohou vést k ferorezonanci. Pár standartních příkladů je uvedeno níže.

5.1 Napěťový transformátor napájený přes kapacitu jednoho (nebo více) otevřených jističů

V sítích vysokého napětí mohou některé spínací operace (sepnutí sběrnice spojky, aktivaci vypínač při vypínání poruchy atp.) vést u napěťových transformátorů zapojených mezi fází a zem k ferorezonanci.

Tyto konfigurace mohou být ilustrovány obvodem na obrázku 7. Otevřený vypínač iniciuje ferorezonanci vybitím kapacity C do transformátoru, který se díky tomu přesytí. Zdroj poskytuje dostatek energie přes ochranné kapacity jističe C_d k udržení rezonance. Kapacita C koresponduje se všemi kapacitami napěťového transformátoru proti zemi.

- Subharmonický model ferorezonance



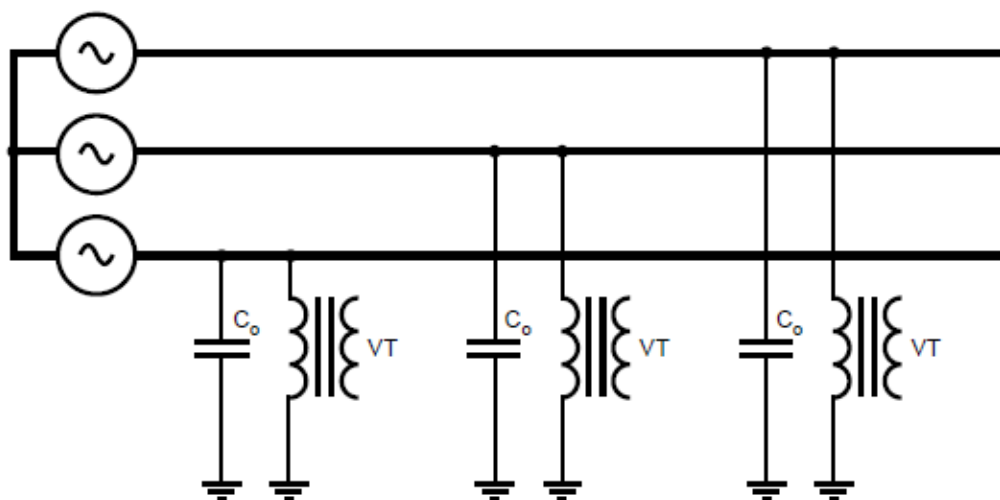
Obr. 7: Transformátor napětí zapojen v sérii s otevřeným vypínačem.

5.2 Napěťový transformátor zapojený v izolované síti

Tento systém zapojení se používá úmyslně nebo může vzniknout díky přerušení zemního vodiče.

Přechodné přepětí nebo nadproudy způsobené spínáním soustavy (změna zatížení, vypnutí poruchy) nebo vznik zemního spojení mohou způsobit přesycením jádra jednoho nebo dvou napěťových transformátorů paralelního ferorezonančního obvodu na obrázku 8. Ferorezonance je pak měřitelná na fázových vodičích nebo na středním vodiči soustavy.

V neutrálním bodě je nestálý potenciál vzhledem k zemi, toto může způsobit jednofázový zkrat proti zemi. V jedné nebo dvou fázích může významně překročit jmenovité hodnoty, což může způsobit proražení izolačního systému a poruchu některé součásti systému. Také může dojít k vybuzení ferorezonance v periodickém, subharmonickém nebo kvazi-periodickém módu.

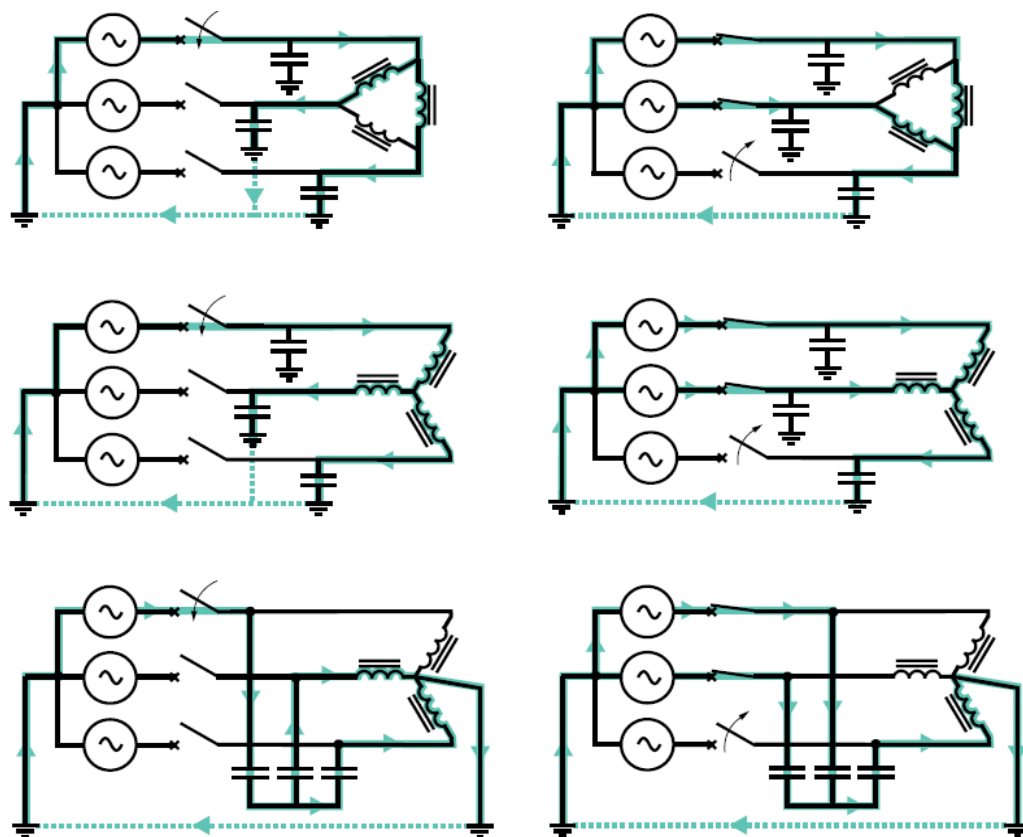


Obr. 8: Ferorezonance přístrojových transformátorů napětí v IT síti

5.3 Transformátor napájený pouze jednou nebo dvěma fázemi

Několik příkladů této situace je na obrázku 9. Tyto stavy mohou nastat, pokud je jedna nebo dvě fáze odpojena. Příčinou je spálení pojistek vysokého napětí, porušení vodiče nebo jiné živé části. Rezonanční kapacity tvoří parazitní kapacita podzemního kabelu nebo nadzemní linky napájející transformátoru, jehož primární vinutí je spojeno s izolovanou nulou nebo je zapojeno do trojúhelníku. Například sériový ferorezonanční obvod je utvořen parazitní kapacitou fázového vodiče proti zemi (úsek mezi vepínačem a transformátorem) přerušeného fázového vodiče a magnetizační impedancí transformátoru. V tomto případě vznikne ferorezonance buď periodická, subharmonická nebo chaotická.

Sdružené a fázové kapacity, skupinové spojení primárních a sekundárních vinutí, konfigurace/typ jádra transformátoru, uzemnění zdroj napětí soustavy (přímo uzemněná, uzemněná, izolovaná) a napájecí režim (jedna fáze, dvě fáze) jsou všechny faktory ovlivňující vzniklý stav. Izolované soustavy jsou náchylnější k ferorezonanci. K omezení rizika se používají vícepólové odpínací přístroje.



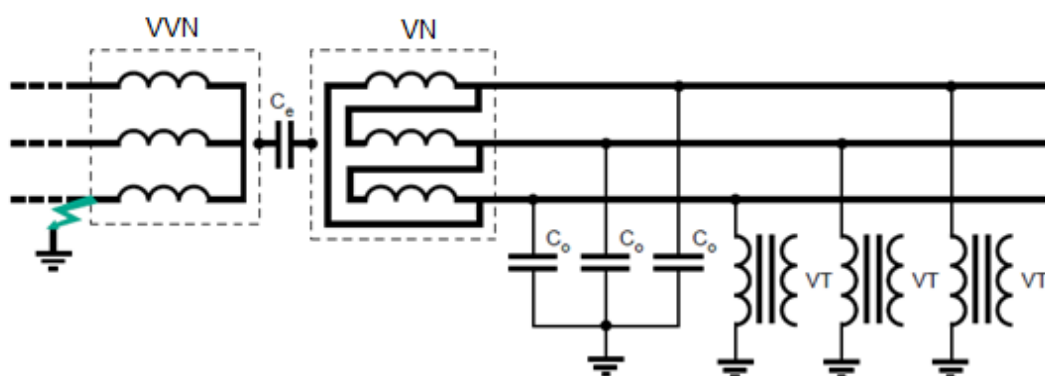
Obr. 9: Příklady asymetricky napájených systémů s rizikem ferorezonance

5.4 Napět'ové transformátory a transformátory vvn/vn s izolovanou nulou

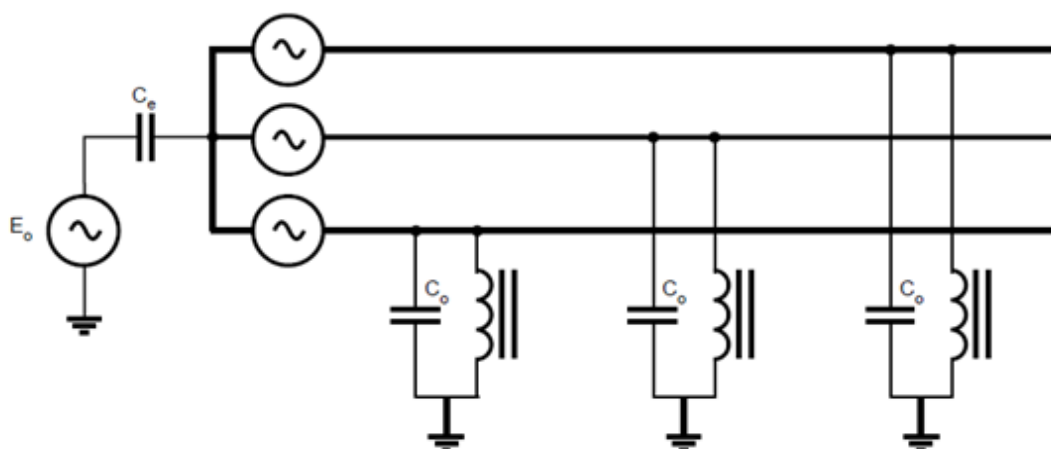
Ferorezonance může nastat, pokud jsou středy soustav vvn a vn izolované a nezatížené napět'ové transformátory jsou zapojeny na vn stranu mezi fázemi a zem (obr 10a). Když vznikne zemní zkrat na straně vvn, tak se objeví na středu soustavy vvn vysoký potenciál. Kapacitní vazbou mezi primárním a sekundárním vinutím vvn/vn transformátoru se přenesou přepětí na stranu vn a může iniciovat ferorezonanci v obvodu vytvořeném napájecím zdrojem E_0 , kapacitami C_e a C_0 a magnetizační indukčností napět'ového transformátoru (obr 10b).

V případě, když je porucha na straně vvn odstraněna, může zbytkový potenciál středu soustavy vn vznikající nesymetrií parazitních kapacit postačit k udržení trvalé ferorezonance. V tomto případě je ferorezonance harmonická.

a - vadný systém



b - náhradní schéma



Obr. 10: Ferorezonance přístrojových transformátorů přes kapacitu napájecího transformátoru

E0: napětí středu soustavy vvn strany

Ce: parazitní kapacita mezi vvn a vn vinutími transformátoru

C0: parazitní kapacity vn vedení

5.5 Sítě vn uzemněné Petersenovou tlumivkou

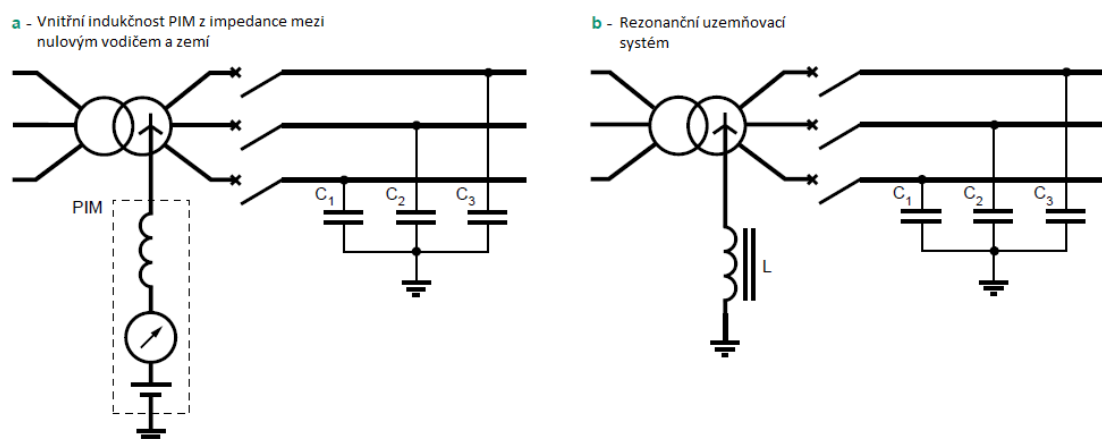
Dvě situace vyobrazené na obr. 11 jsou náchylné k ferorezonanci mezi Petersenovou tlumivkou a kapacitami vedení vůči zemi.

V izolovaných sítích nízkého napětí je doporučeno normou IEC 364 nebo stanovou NF C15- 100 použití monitoru izolačního stavu (dále PIM). Některé PIM měří izolační impedanci soustavy pomocí zavedení stejnosměrného proudu mezi střed soustavy a zem. Impedance PIM je převážně induktivní (nízká impedance pro stejnosměrný proud, a vysoká impedance pro síťovou frekvenci), což může přispět ke vzniku ferorezonance. Přepětí mohou způsobit dostatečný nárůst potenciálu středu soustavy a vybudit ferorezonanci mezi Petersenovou tlumivkou a kapacitou mezi zemí a sítí obr. 11a.

V sítích vn je z důvodu omezení proudů při zemních poruchách a z důvodu zlepšení samozhášení oblouku zemního zkratu cívka o indukčnosti L ($3LC_0\omega_0^2 = 1$, kde C_0 je kapacita nulové složky vn systémy a ω_0 je úhlová frekvence výkonových pulsací). Tato cívka se zapojuje mezi střed soustavy vn transformátoru vvn/vn a zem (Petersenova cívka). Vybuzení a začátek rezonance obvodu skládajícího se ze sériově zapojené indukčnosti L a kapacit $3 C_0$ může nastat v následujících případech:

- střed soustavy vvn transformátoru vvn/vn je vlivem poruchy uzemněn a poruchový proud vvn protéká zemním vodičem rozvodny,
- saturace jádra vvn/vn HV / MV transformátoru
- nesouměrnost transformátoru
- přirozená asymetrie mezi kapacitami (C_1, C_2, C_3 na obrázku 10b) vůči zemi.

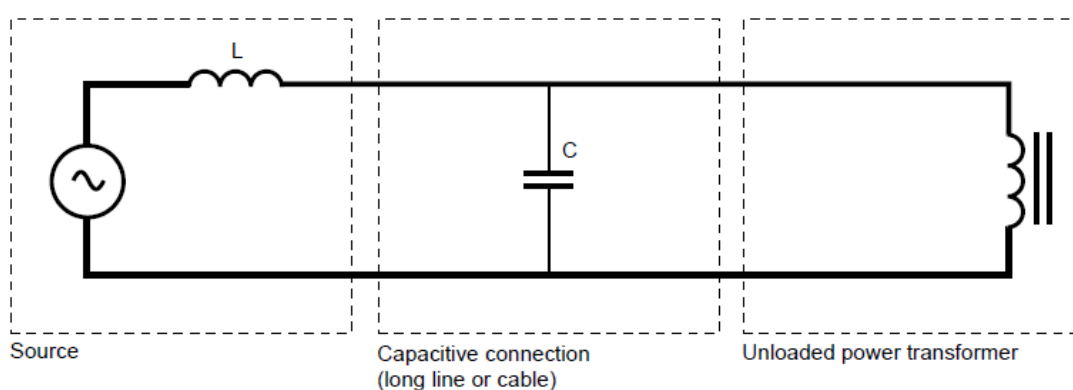
Tyto jevy mohou způsobit saturaci jádra transformátoru a vybudit ferorezonanci.



Obr. 11: Síť IT uzemněná přes reaktor

5.6 Transformátor napájený vedením s vysokou kapacitou a nízkým zkratovým výkonem

K ferorezonanci může dojít, pokud je nezatížený transformátor náhle připojen ke zdroji s nízkým zkratovým proudem v porovnání se jmenovitým výkonem transformátoru přes podzemní kabel nebo dlouhé venkovní vedení. K tomu dochází například po obnovení provozu vn (podzemní kabel) městské nebo průmyslové napájecí sítě, ale také ve velmi dlouhých venkovských sítích (viz obr. 12) nebo v sítích podzemními kabely (stále častěji používány z důvodu spolehlivosti a estetiky). Tato paralelní ferorezonance (kapacity paralelně připojeny na magnetizační indukčnost transformátoru) je obvykle trojfázová periodická nebo kvaziperiodická.



Obr. 12: Náhradní obvod nezatíženého výkonového transformátoru napájeného vedením s vysokou kapacitou

5.7 Shrnutí

Konfigurace, ve kterých může dojít k ferorezonanci, jsou nesčetné. Existuje mnoho různých typů ferorezonance: jednofázová, třífázová, soufázový režim nebo diferenciální režim. Zkušenosti umožňují identifikovat některé rizikové konfigurace, kterým by měla být věnována zvýšená pozornost. Jedná se o:

- přístrojové transformátory napětí připojené mezi fází a zem v IT síti,
- transformátor napájený prostřednictvím dlouhého vedení s velkou kapacitou proti zemi,
- jištění pojistkami, jejichž vybavení nezpůsobí přerušení obvodu ve všech třech fázích,
- nezatížené nebo málo zatížené přístrojové transformátory napětí nebo výkonové transformátory.

Jevy nejčastěji spouštějící ferorezonanci jsou:

- spínání kondenzátorových baterií a nezatížených vedení,
- poruchy izolace,
- blesky,
- spínání nezatížených transformátorů.

6 Měření

Pro experimentální část práce byly zvoleny pouze některé z výše uvedených situací, ve kterých může docházet k ferorezonanci:

- Napěťový transformátor napájený přes kapacitu jednoho (nebo více) otevřených jističů (kap. 5.1) nebyl řešen, protože zde ferorezonance vzniká v jednotlivých fázích nezávisle a nejde tedy o ferorezonanci trojfázovou, ale jednofázovou.
- Napěťový transformátor zapojený v izolované síti (kap. 5.2) nebyl řešen, protože zde jde o paralelní ferorezonanci, která je málo riziková ve srovnání s rezonancí sériovou.
- Transformátor napájený pouze jednou nebo dvěma fázemi (kap. 5.3) byl vybrán pro experimentální část, protože se zde vyskytuje sériové rezonance napříč trojfázovou soustavou.
- Napěťové transformátory a transformátory vvn/vn s izolovanou nulou (kap. 5.4) nebyly řešeny, protože zde je konfigurace složitější a byly by zapotřebí dva nezávislé napěťové zdroje.
- Sítě vn uzemněné Petersenovou tlumivkou (kap. 5.5) nebyly zkoumány, protože zde jde o ferorezonance Petersonovy tlumivky nikoli přístrojových transformátorů napětí.
- Transformátor napájený vedením s vysokou kapacitou a nízkým zkratovým výkonem (kap. 5.6) nebyl zkoumán, protože zde jde o ferorezonanci výkonového a nikoli přístrojového transformátoru.

Další experimenty se tedy zabývají trojfázovou sítí napájenou přes pojistky, kde došlo k vybavení jedné nebo dvou pojistek, případně také k porušení jednoho z fázových vodičů. Bylo zkoumáno zapojení přístrojových transformátorů v obvyklém zapojení proti zemi a také při Aronově zapojení, které se někdy z úsporných důvodů používá.

Pro měření ferorezonance jsem použil speciálně upravený přístrojový transformátor VTS25. Úprava spočívá v použití pouze magnetického jádra a sekundárního vinutí transformátoru. Primární vinutí není z bezpečnostních důvodů použito, aby v obvodu nevznikalo nebezpečné vysoké napětí.

Měření ferorezonance probíhá tedy na sekundární straně vinutí (strana nízkého napětí) z bezpečnostních důvodů a z důvodu jednodušší realizaci rezonančního obvodu při nižším napětí (100 V) oproti reálné hladině napětí sítě vn 22 kV. Toto zjednodušení je možné díky těsné magnetické vazbě přístrojového transformátoru (VTS25) ze sekundárního vinutí na primární vinutí. Výsledky jsou tedy ekvivalentní pokusům na vysokém napětí s uvažováním převodu transformátoru, u VTS25 je $p = 220$. Převod transformátoru je dán vztahem (platí pro ideální transformátor) :

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (6.0)$$

Převod veličin na primární stranu:

$$U_1 = U_2 p, \quad (6.1)$$

$$I_1 = \frac{I_2}{p}, \quad (6.2)$$

$$C_1 = \frac{C_2}{p^2}, \quad (6.3)$$

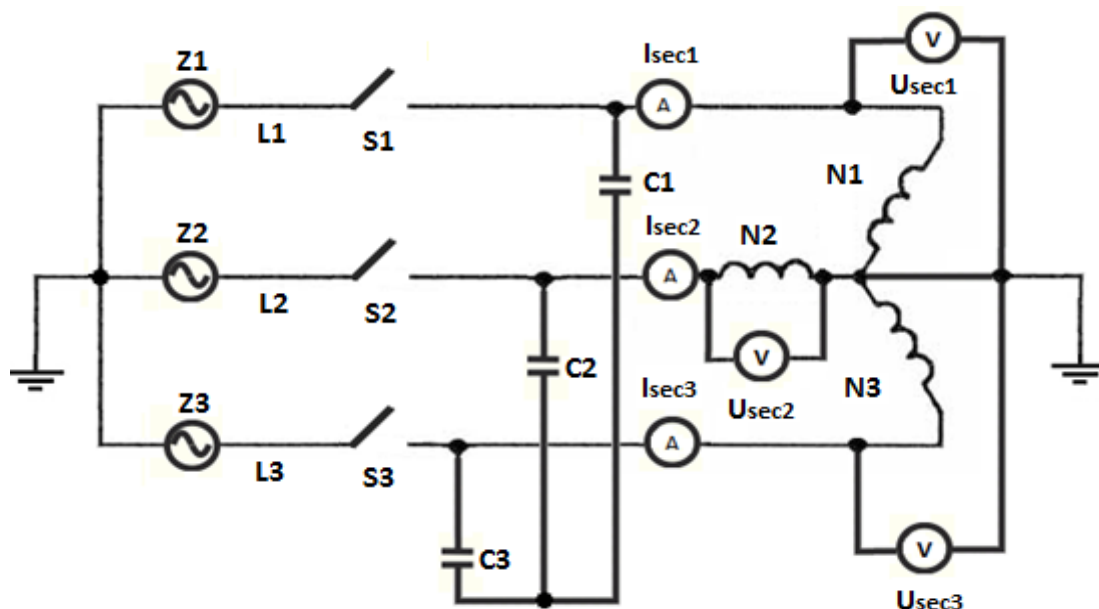
Pro simulování parazitních kapacit vedení vn byla použita přepínatelná baterie kondenzátorů v binární řadě ovládaná relé. Baterie umožňuje nastavení kapacit nezávisle v každé fázi v rozmezí 1–63 μF . V následných experimentech jsem nastavoval hodnoty pro jednotlivé kapacity od 10 μF do 60 μF , s krokem 10 μF .

Napájecí síť byla simulována programovatelným výkonovým zdrojem Chroma 61704, který umí programově ovládat výstupní napětí a disponuje výkonem až $3 \times 2 \text{ kVA}$. U každé hodnoty kapacity bylo postupně zvyšováno napětí zdroje a při každé nastavené hodnotě následně změřeny tyto veličiny: napětí na vinutí přístrojových transformátorů (U_{sec}), proud na vinutí (I_{sec}), napětí zdroje (U_{zdr}). Napětí bylo zvyšováno až do mezní hodnoty a dále plynule snižováno téměř k nule. Mezní hodnota napětí byla experimentálně vyzkoušena. Omezení plyne z proudového limitu napájecího zdroje – trvalý proud 16 A, špičkový 90 A.

Dále byly použity přepínací relé ovládané mikrokontrolerem pomocí příkazů zasílaných po sériové lince. Těmito spínači byl simulován výpadek napětí z důvodu přerušení pojistky.

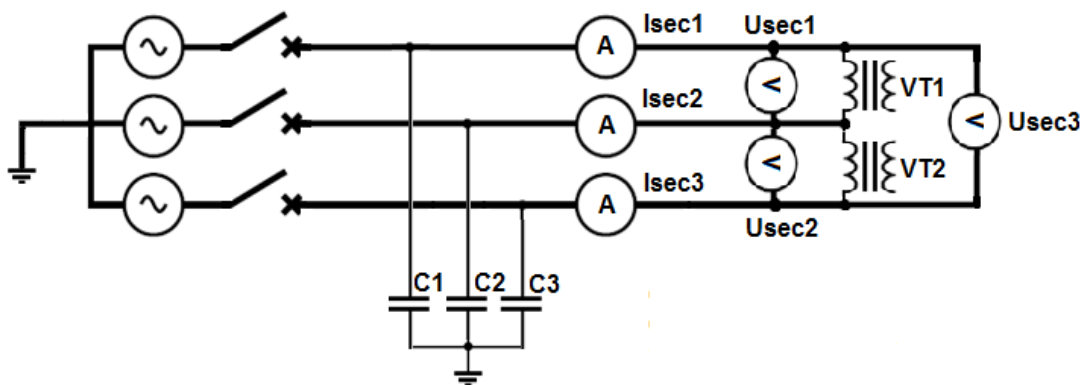
6.1 Schémata zapojení

Konfigurace měřeného obvodu je na obr. 13. Na něm byly měřeny stavy s přerušenou jednou nebo dvěma fázemi ve shodě s obr. 9. Zapojení neuzemněných kondenzátorů se v tom případě chová jako kapacitní dělič. Vinutí transformátorů je zapojeno do hvězdy.



Obr. 13: Třífázová soustava se sekundárním vinutím transformátoru

Na obr. 14 je znázorněna konfigurace obvodu s přístrojovými transformátory v Aronově zapojení. Toto zapojení trojfázové sítě má zapojené vinutí transformátoru v podstatě do trojúhelníku, ale jedna fáze vinutí je odpojena, viz obr. 9.



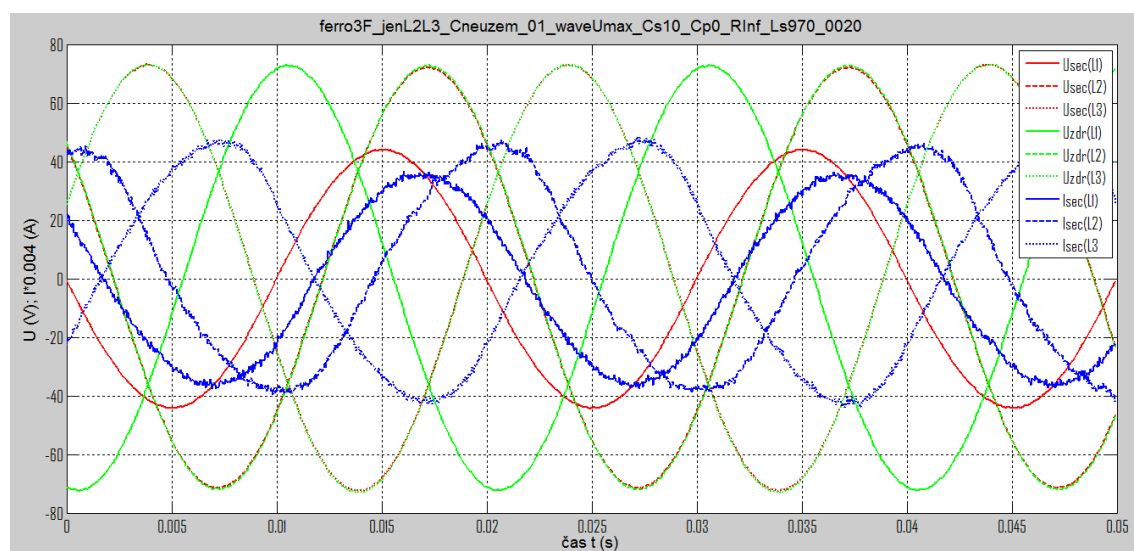
Obr. 14: Aronovo zapojení

6.2 Použité přístroje

Z1, Z2, Z3	Programovatelný výkonový zdroj Chroma model G61704
C1, C2, C3	Baterie kondenzátorů 3f (1, 2, 4, 8, 16, 32 μ F/250V)
N1, N2, N3	3× Tlumivka pro měření ferorezonance (VTS 25)
A (Isec1, Isec2, Isec3)	3× Proudová sonda FL LIKE i30s
S1, S2, S3	Přepínací relé (10A/230V)
	NI USB 6251 měřicí karta

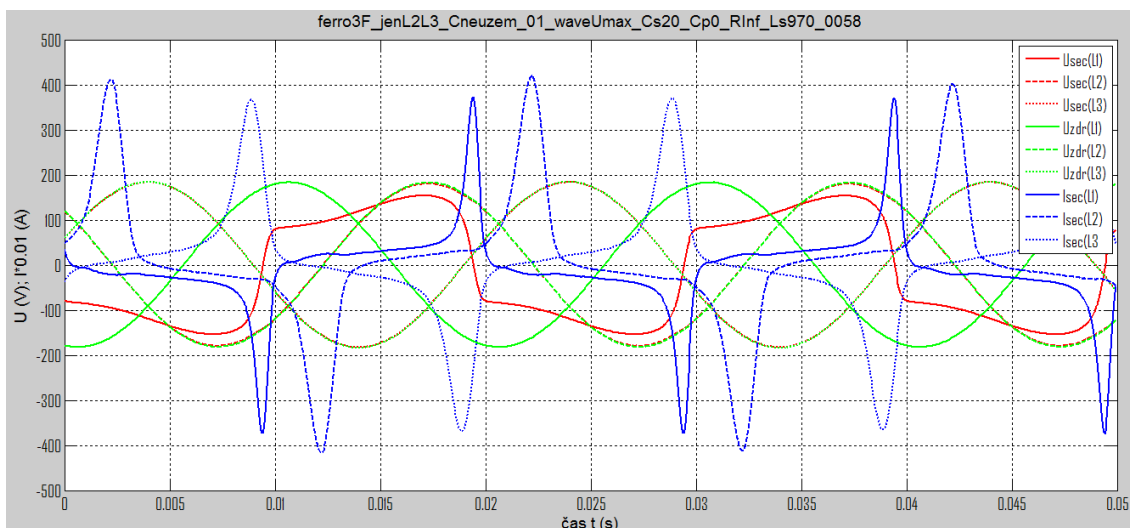
6.3 Výsledky

Na obrázku 15 je vidět normální stav, kde ještě ferorezonanční jev nenastal. Zelené signály zobrazují průběhy napětí na zdroji. Modré jsou průběhy proudů měřené na sekundárních vinutích. Na sepnutých fázích L2 a L3 je vidět induktivní fázový posuv o necelých 90° způsobený přímo připojenými přístrojovými transformátory. Transformátor zapojený ve fázi L1 je napájen přes kapacitní dělič. Je zde výrazný fázový posun napětí na transformátoru oproti napětí zdroje. Sečtením fázově posunutých napětí na L2 a L3 na kapacitním děliči je výsledná amplituda napětí na transformátoru o $\sqrt{3}$.



Obr. 15: Normální průběh obvodových veličit při sepnutých dvou fázích (L2, L3) v zapojení podle obr. 13

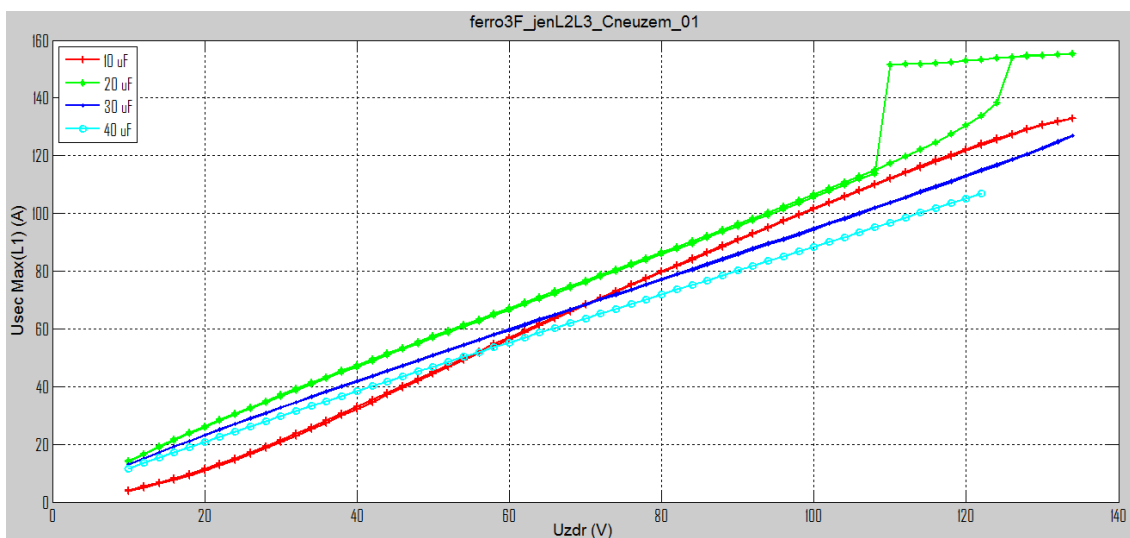
Z důvodu snižujícího efektu kapacitního děliče došlo k ferorezonanci pouze u nejvyšších hodnot napětí, viz obr 16. Zde dochází k rezonanci nesepnuté fáze sekundárního vinutí L1. Deformace napětí na transformátoru 1 je typická pro ferorezonanční jev.



Obr. 16: Rezonující průběh při sepnutých dvou fázích (L2, L3) v zapojení obr. 13

Obrázek 17 zobrazuje úbytek napětí na transformátoru zapojeného ve fázi L1 v závislosti na napětí zdroje. Průběh je lineární až po dobu ferorezonance, která vzniká v této konfiguraci pouze s kondenzátory o velikosti 20 μF . Napětí na zdroji se postupně zvyšuje, až při 126 V dojde k ferorezonanci a díky tomu se napětí na transformátoru skokově zvýší. Při poklesu napětí zdroje ferorezonance skokově zanikla při 110 V a průběh se vrátil do lineární oblasti.

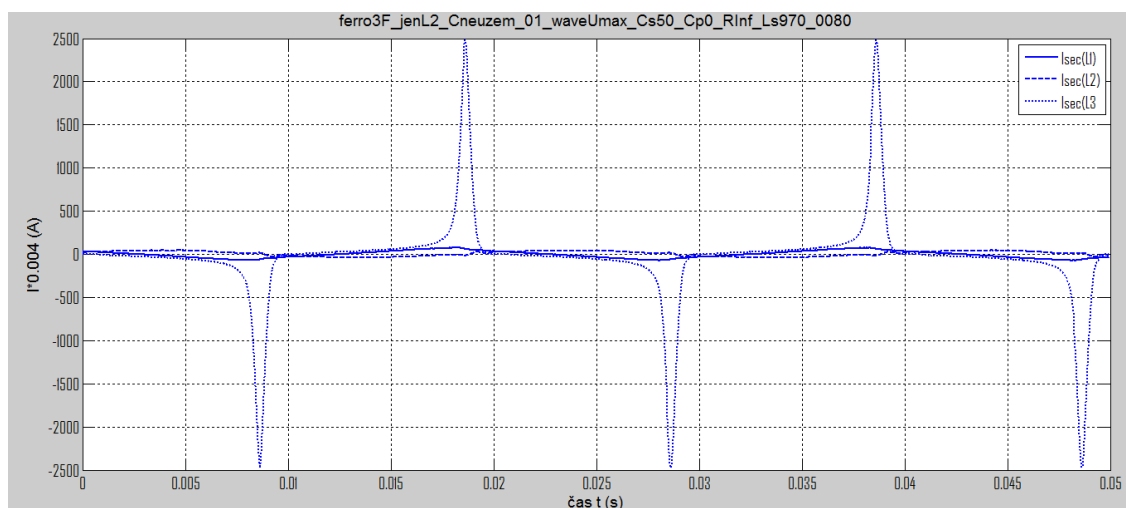
Na přímo napájených fázích L2 a L3 nedochází k ferorezonanci a průběh je lineární.



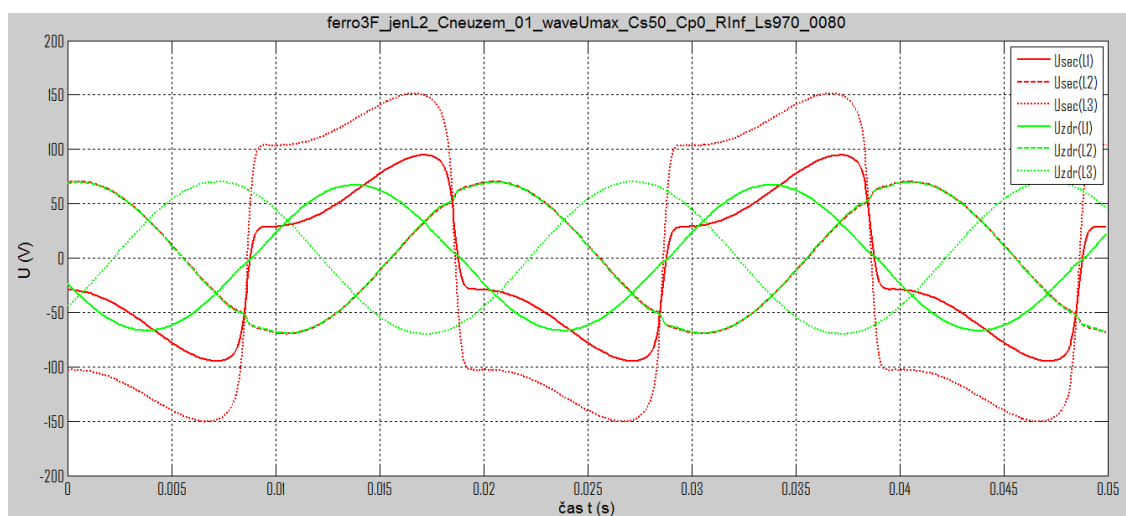
Obr. 17: Graf upadnutí do ferorezonance

Na obrázcích 18 a 19 jsou průběhy z měření při napájení pouze do jedné fáze (sepnuto pouze S2), kdy vnikl typický příklad harmonické ferorezonance.

Na proudu $I_{\text{sec}}(L3)$ je vidět saturace jádra vinutí – typické špičky. Proudů v ostatních fázích jsou malé. Napětí na sekundárním vinutí $U_{\text{sec}}(L1)$ a $U_{\text{sec}}(L3)$ má tvar periodické ferorezonance. Deformace sekundárních napětí $L1$ a $L3$ je typická pro harmonickou ferorezonanci. Sekundární napětí fáze $L2$ kopíruje průběh napětí zdroje fáze $L2$, protože spínač $S2$ je sepnutý. Ve skutečnosti došlo k ferorezonanci pouze ve fázi $L3$, což demonstruje rozdíl napěťových hladin mezi $L3$ a $L1$. Příčinou je velikost odebrané energie z parazitních kondenzátorů $C1$, $C3$. Vinutí transformátoru zapojeného ve fázi $L3$ odebírá více energie než fáze $L1$. Napětí na $L1$ pouze kopíruje $L3$, ale jeho velikost není dostatečná k saturaci jádra transformátoru, což potvrzuje nízký proud $I_{\text{sec}}(L1)$.

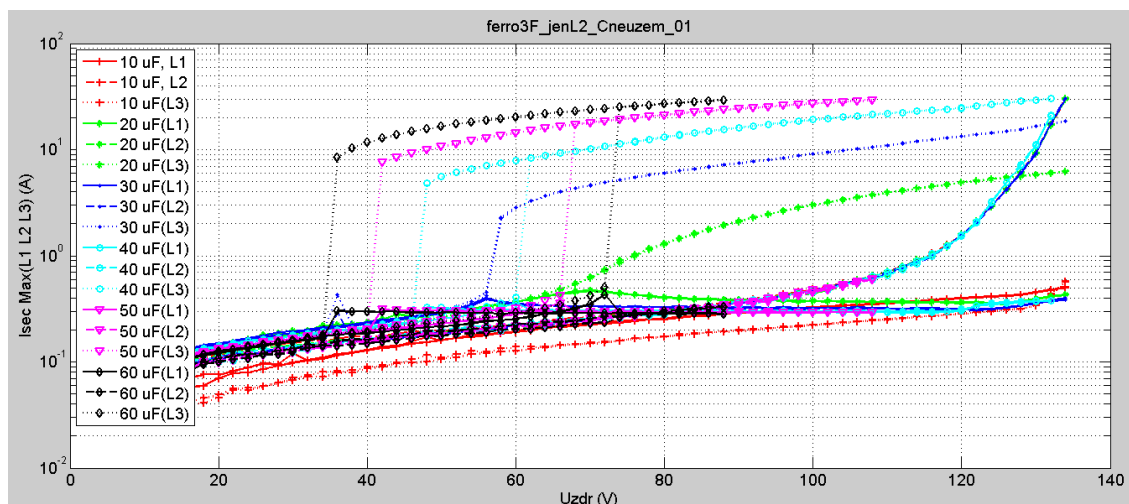


Obr. 18: Průběh proudu na sekundárním vinutí



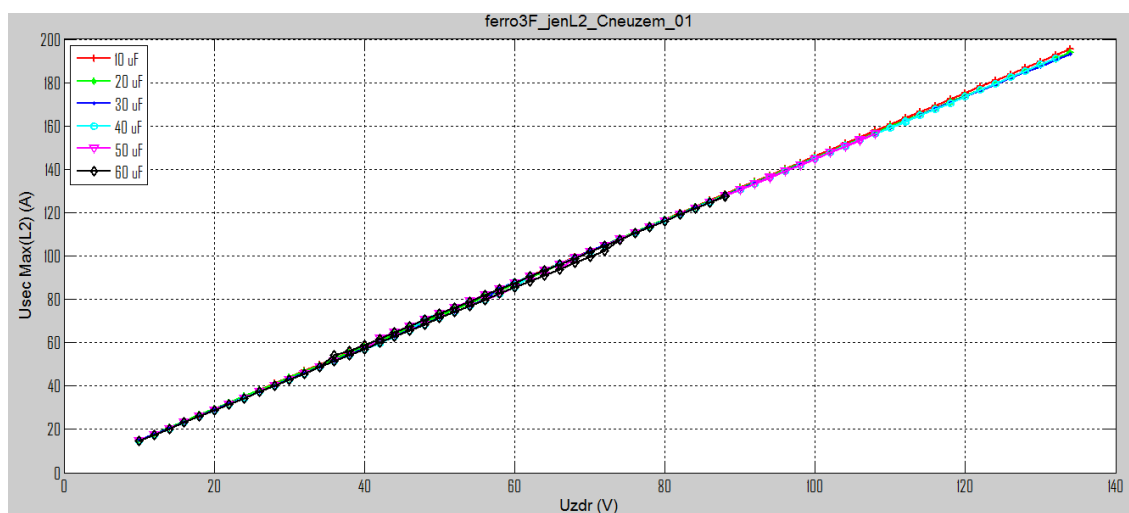
Obr. 19: Průběh napětí na zdroji a sekundárním vinutí

Na obrázku 20 je zobrazena závislost proudu vinutími na napětí zdroje. Pro zpřehlednění výsledků jsem vykreslil jednotlivé fáze zvlášť, viz obr 21–23. Zřejmé je, že k ferorezonanci došlo v rozmezí kapacit 30–60 μF .



Obr. 20: Graf upadnutí do ferorezonance pro všechny fáze

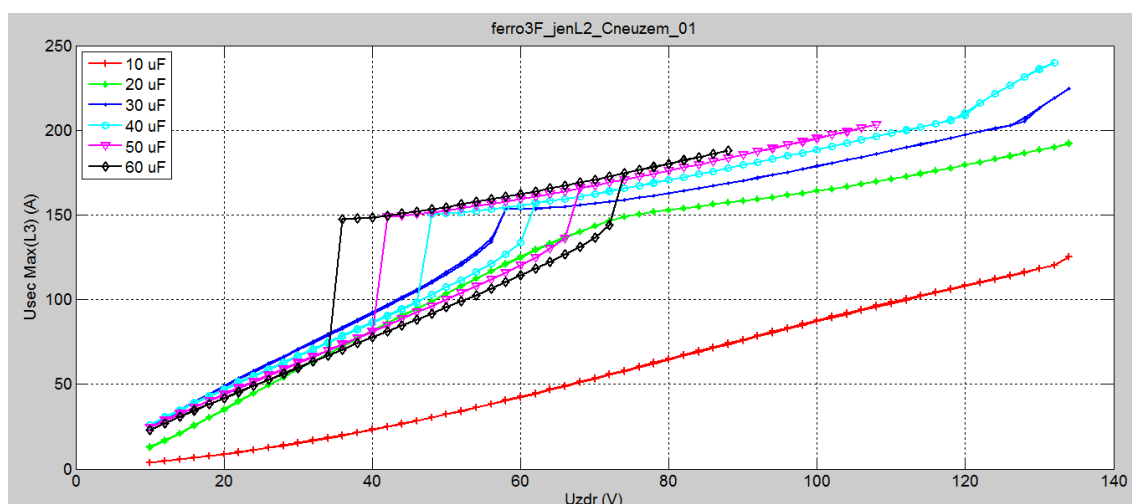
Průběh sepnuté fáze L2 je čistě lineární, nevzniká zde žádné zkreslování signálu vlivem parazitních kondenzátorů, které v této fázi se nevytvoří sériový rezonanční obvod, ale kondenzátor je zapojen paralelně s napájecím zdrojem.



Obr. 21: Graf upadnutí do ferorezonance fáze L2

Na obrázku 22 je průběh závislosti úbytku na sekundárním vinutí (fáze L3) na napětí zdroje, která popisuje stav upadnutí do ferorezonance pro jednotlivé kapacitní hladiny. Skoky při hodnotách 40, 50, 60 μF zobrazují vznik a zánik ferorezonance. Tato skoková změna je popsána v teoretické části v kapitole 4 na obrázku 5. Ferorezonanční skok popisuje chování přechodu mezi stavem ferorezonance a základním stavem. Ferorezonance pro kapacitu 60 μF vzniká při napětí zdroje 72 V a zaniká při 35 V. Toto rozmezí je obzvláště nebezpečné, protože uprostřed něj leží jmenovitá hodnota napětí soustavy – na sekundární straně transformátorů je to $100/\sqrt{3} = 57,7$ V. Pokud v praxi dojde k ferorezonanci půjde o ferorezonanci trvalou, která zatěžuje obvod dlouhodobě a je tedy obzvláště nebezpečná.

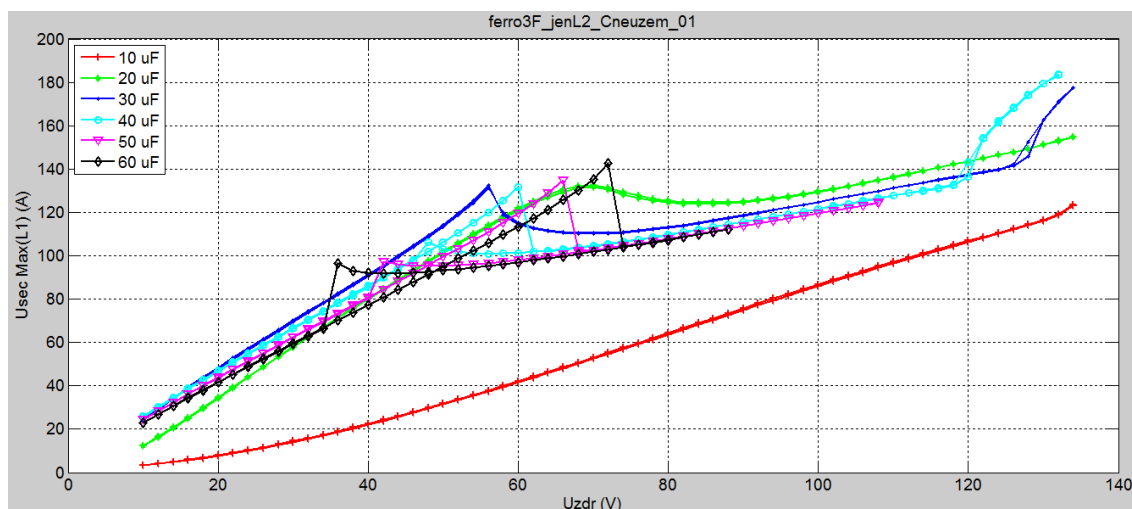
V případech kdy nenastane ferorezonance je průběh napětí lineární. Čím více se blíží ferorezonanční jev (se zvyšující se kapacitou), tím se více zkresluje lineární průběh. To je způsobeno tvarem magnetizační smyčky transformátoru, viz průběh pro 20 μF .



Obr. 22: Graf upadnutí do ferorezonance fáze L3

Průběh sekundárního napětí (fáze L1) vůči napětí na zdroji na obr. 23 Počátek průběhů do okamžiku naskočení ferorezonance je identická s obrázkem 22, tedy fází L3. V okamžiku, kdy došlo k rezonanci ve fázi L3 vysála tato fáze energii z kapacitního děliče a napětí na transformátoru ve fázi L1 se naopak propadne. Zajímavý je projev při snižování napětí zdroje, kdy napětí na transformátoru v L1 překračuje hodnoty z nerezonujícího lineárního režimu.

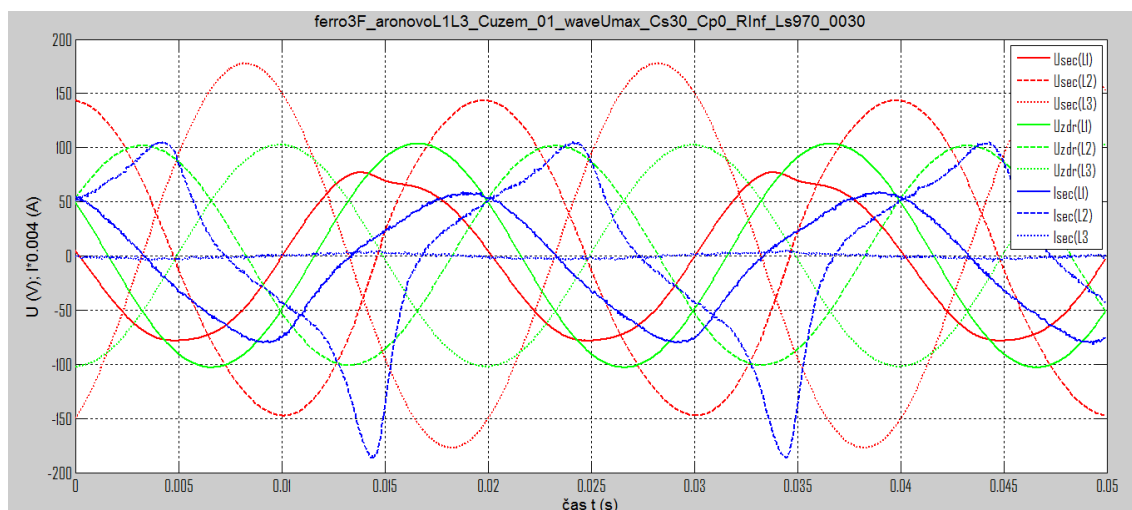
K vlastní ferorezonanci ve fázi L1 dochází až na konci testovaného rozsahu napětí zdroje a to při kapacitách 30 a 40 μF na 128, resp. 120 V.



Obr. 23: Graf upadnutí do ferorezonance fáze L1

Aronovo zapojení

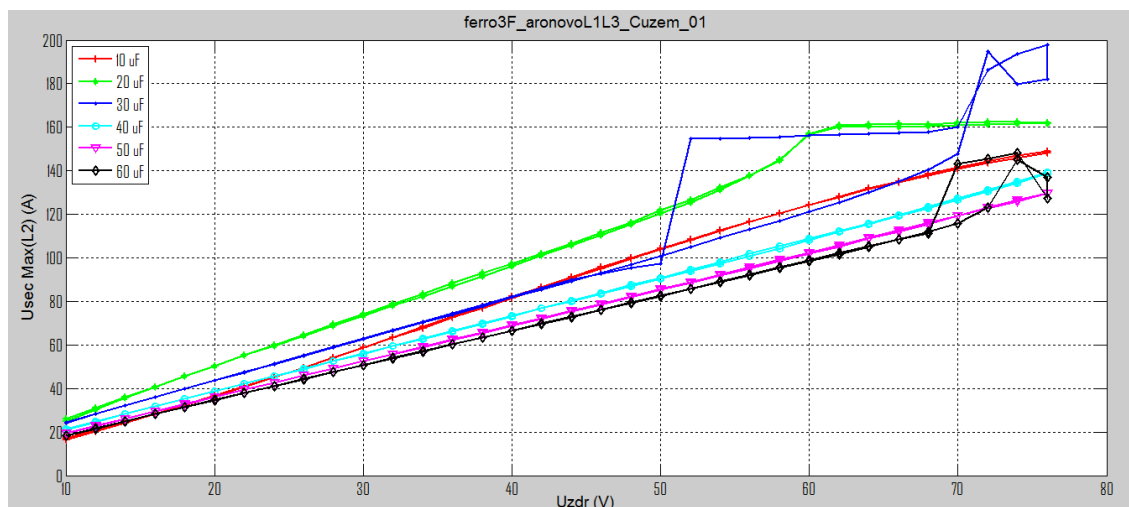
Průběh na obr. 24 zobrazuje obvodové veličiny v obvodu těsně před začátkem ferorezonance. Dobře patrné jsou špičky magnetizačních proudů ve fázi L2 vlivem začátku přesycení transformátoru.



Obr. 24: Průběh napětí U_{sec} , U_{zdr} , I_{sec}

V Aronově zapojení podle obr. 14 dochází k ferorezonanci při nižších hodnotách kapacit. V tomto případě na 30 μF a 20 μF . K rezonanci dojde na nižších hodnotách napětí z důvodu zapojení transformátorů na sdružené napětí. V přímo zapojené fázi

nedošlo k rezonanci a průběhy jsou proto lineární ve všech případech, proto průběh neuvádím.



Obr. 25: Graf upadnutí do ferorezonance, fáze L3

V tabulce 1 jsou shrnuty rozsahy kapacit, u kterých je riziko vzniku ferorezonance. Ferorezonance je dále rozdělena podle míry rizika. Nebezpečná oblast je pokud k rezonanci dochází na jmenovitém napětí soustavy 57,7 V resp. $22/\sqrt{3}$ kV při přepočtu na primární stranu. Ferorezonance je pak trvalá. Rizikovou oblast výskytu ferorezonance je mimo oblast jmenovitého napětí, kde se vyskytuje ferorezonance jen krátkodobě při přechodných dějích.

Hodnoty kapacity v tabulce 1 jsou přepočítány podle převodního vztahu (6.3) na primární stranu tak, aby mohli být vodítkem pro projektanty vn sítí.

Tab. 1. Rizikové a nebezpečné oblasti kapacit v sítích vn 22 kV

Konfigurace zapojení	výpadek fáze	Nebezpečná oblast	Riziková oblast
zapojení do hvězdy	L1	x	0,413 nF
	L1,L3	0,826 nF - 1,033 nF	1,24 nF
Aronovo zapojení do trojúhelníku	L2	0,619 nF	1,24 nF

7 Závěr

Provedeným měřením byl zjištěn rozsah hodnot kapacit potřebných k vybuzení ferorezonance u zapojených obvodů a mezní napětí těchto kondenzátorů.

Z naměřených hodnot lze vyčíst, že na hodnotě kondenzátorů závisí průběh napětí a proudů. Čím je větší kapacita, tím je menší impedance a tím více energie protéká a dojde k saturaci. Podle hodnoty kapacity se průběh napětí deformuje.

Ze série získaných hodnot v příloze A, lze pak odečítat riziko ferorezonance v konkrétních aplikacích daného typu transformátoru.

Při ferorezonanci nastává deformace tvaru napět'ové vlny, takže průběh už není sinusový. Zároveň je elektromagnetická energie uložena v transformátoru ve stavu přesycení, magnetický tok a proud má typický tvar se strmými špičkami v okolí průchodu napětí nulou.

I po téměř desítkách let zkoumání je ferorezonance díky své složitosti stále aktuálním tématem vyžadujícím pozornost projektantů, zkoušek a měření. Riziko vzniku ferorezonance stoupá s nasazováním nových technologií, které usilují o snížení ztrát v elektrotechnice, klesá tak tlumení obvodu.

Doposud nebylo zjištěno, z jakých příčin dochází ke zničení transformátorů, jestli to způsobují tepelné účinky, namáhání vinutí zvýšenou hodnotu napětí nebo poškození vinutí následkem kmitavého proudu. Pravděpodobně jde o synergický účinek všech těchto jevů.

V dnešní době už je ferorezonance poměrně dobře prozkoumána, ale stále je velký dluh v osvětě projektantů a operátorů sítí. Tato práce přispívá k vymezení rizikových parametrů obvodu a může být vhodným vodítkem právě pro projektanty sítí vysokého napětí.

Seznam literatury:

- [1] FERRACCI, Philippe. Cahier technique no 190 – Ferroresonance. [online]. [cit. 2. 10. 2012]
- [2] Rozvod elektrické energie [online]. 2010 [cit. 2013-04-9]. Dostupné z: www.csvts.cz/cenes/prezentace/prepeti/PNE_330000_8p.doc
- [3] Ferorezonance v elektrických sítích [online]. 2008 [cit. 2012-011-9]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8681
- [4] ETM Elektrotechnický magazín: Odborný magazín pro elektrotechniky, energetiky, projektanty, zájemce o silnoproudou elektrotechniku, podnikatele a investory v oborech elektro. Elektrotechnický magazín. 2007, č. 8. DOI: Elektrotechnický magazín ETM.
- [5] Electric Power engineering. Electric Power engineering. 2008, č. 5.
- [6] RLC obvod Jaroslav Reichl [online]. 20.4 2013. Dostupné z: http://www.jreichl.com/fyzika/vyuka/texty/rlc_obvody.pdf
- [7] KOČIŠ, Lubomír. Ferorezonance v sítích vn a vvn – principy a opatření. Elektrotechnický magazín ETM 8/2007
- [8] TOMAN, Petr. Přístrojové transformátory napětí. Str. 133-198. Kapitola v: CHMELÍK, Karel, kol. Chránění III – elektrická zařízení vysokého napětí. Irena Satinská – IRIS. 2005. ISBN 80-903540-5-X
- [9] ABB: Ferroresonance, prezentace 2007 [online]. 20.1 2013. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/2e4528a2d55c5414c12572dd00247313/\\$file/VT%20guard_presentation-ferrores_sales_version_eng.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/2e4528a2d55c5414c12572dd00247313/$file/VT%20guard_presentation-ferrores_sales_version_eng.pdf)
- [10] KPB INTRA. VTS 25 [online]. 2012 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.kpbintra.cz/cz/produkty/VTS25.html>

Příloha A: Fotodokumentace



Obr. 26: Fotografie měřicího pracoviště

Příloha B: Obsah přiloženého CD

- Tato práce v elektronické podobě
 - Název souboru: Bakalářská práce
 - Formát: PDF

- Měřicí skript
 - Název souborů: NI_ferrorez_3F_VTStlum
IN_ferorez_VTS25_sub

- Naměřené hodnoty
 - Názvy souborů: ferro3F_jenL2_Cneuzem_01
ferro3F_jenL2L3_Cneuzem_01
ferro3F_aronovoL1L3_Cuzem_01